

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАО ВО

«Сибирский федеральный университет»

институт

«Электроэнергетика»

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ Г. Н. Чистяков

подпись      инициалы, фамилия

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

## БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

код – наименование направления

«Электромеханические переходные процессы в асинхронном двигателе»

тема

Руководитель

\_\_\_\_\_

подпись, дата

профессор, д.т.н.

должность, ученая степень

В.П.Кочетков

инициалы, фамилия

Выпускник

\_\_\_\_\_

подпись, дата

К.Б. Потапов

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А. В.Коловский

инициалы, фамилия

Абакан 2017

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Хакасский технический институт – филиал ФГАО ВО  
«Сибирский федеральный университет»  
институт  
«Электроэнергетика»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
Г. Н. Чистяков  
подпись      инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_ »      \_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ  
в форме бакалаврской работы**

Студенту Потапову Кириллу Борисовичу  
фамилия, имя, отчество

Группа 3-12 Направление (специальность) 13.03.02  
номер код

«Электроэнергетика и электротехника»

наименование

Тема выпускной квалификационной работы «Электромеханические  
переходные процессы в асинхронном двигателе»

Утверждена приказом по университету № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Руководитель ВКР Кочетков Владимир Петрович, доктор технических  
наук, профессор, профессор кафедры "Электроснабжение"

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР Технические характеристики и сведения о  
параметрах асинхронных двигателей мощностью 4кВт и 55кВт

Перечень разделов ВКР

1. Введение;
2. Актуальность темы;
3. Математическое описание электропривода переменного тока;
4. Исследование многофазного асинхронного двигателя;

Перечень графического материала

1. Структурная схема и модель короткозамкнутого двигателя во вращающейся системе координат;
2. Модель и осциллограммы шестифазного асинхронного двигателя;
3. Уравнения в векторной форме;

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_  
подпись

В.П. Кочетков  
инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_ К.Б. Потапов  
подпись, инициалы и фамилия студента

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Электромеханические переходные процессы в асинхронном двигателе» содержит 59 страниц текстового документа, 3 приложения, 25 использованных источников, 3 листа графического материала.

Ключевые слова: электропривод переменного тока, многофазный асинхронный двигатель, частотное регулирование, переходный процесс.

Объект исследования – асинхронный короткозамкнутый двигатель 4 кВт и 55 кВт.

Цель исследования:

-сравнение протекания переходного процесса в асинхронном короткозамкнутом двигателе с переходным процессом в двигателях с увеличенным количеством фаз.

Научная новизна заключается в применении методики решения дифференциальных уравнений в векторной форме, разработанной на кафедре электроэнергетики ХТИ – филиала СФУ.

В итоге в работе были представлены результаты исследования электромеханических переходных процессов. В процессе работы были разработаны математические модели полученные из структурных схем и были получены результаты, которые указывали на уменьшение пульсаций момента многофазных двигателей при пуске, так же наблюдаются значительное расширение диапазона регулирования скорости.

## **ABSTRACT**

Final qualification work on topic "Electromechanical Transient Phenomena in the Asynchronous Engine" contains 59 pages of the text document, 3 applications, 25 used sources, 3 sheets of graphic material.

Keywords: electric drive of an alternating current, multiphase asynchronous engine, the frequency regulation, transient phenomenon.

Research object – the asynchronous short-circuited engine of 4 kW and 55 kW.

Research objective:

- comparing of course of transient phenomenon in the asynchronous short-circuited engine with transient phenomenon in engines with the increased quantity of phases.

Scientific novelty consists in application of a technique of the solution of differential equations in the vectorial form developed at department of power industry of HTI – SFU branch.

As a result in operation results of a research of electromechanical transient phenomena were provided. In the course of operation the mathematical models received from skeleton diagrams were developed and results which were specified reduction of pulsations of the moment of multiphase engines in case of start-up were received, are also watched the considerable range extension of regulation of speed.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Актуальность темы .....	9
1.1 Назначение электропривода.....	9
1.2 Управление электроприводом .....	10
1.3 Частотное регулирование асинхронного двигателя .....	13
2 Математическое описание электропривода переменного тока.....	20
2.1 Математическое описание асинхронного двигателя.....	20
2.2 Преобразование координат .....	28
2.3 Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором.....	29
2.4 Математическое описание асинхронного короткозамкнутого во вращающейся системе координат .....	30
3 Исследование многофазного асинхронного двигателя .....	37
3.1 Моделирование шестифазного асинхронного короткозамкнутого в собственной системе координат.....	37
3.2 Описание структурной схемы многофазного асинхронного двигателя.....	48
3.3 Расчет параметров асинхронного двигателя для структурной схемы.....	50
Заключение .....	55
Список использованных источников .....	56

## ВВЕДЕНИЕ

Переходным процессом называется процесс перехода электропривода от одного установившегося состояния к другому. Когда одновременно изменяются скорость, ток, момент двигателя, а также показатели всех звеньев кинематической цепи, соединяющей электродвигатель с рабочим органом механизма.

К переходным процессам относятся пуск, реверс, торможение электропривода, изменение скорости, а также процессы, вызванные изменениями момента на валу электродвигателя, изменением напряжения питающей сети. Характер протекания и длительность переходного процесса определяют производительность, особенно когда длительность рабочего цикла находится в диапазоне времени разгона и торможения. При классификации переходных процессов двигателя могут быть использованы различные признаки. К таким признакам можно отнести, например, исследуемый параметр (скорость), характер возмущения (сброс, наброс нагрузки), характер изменения исследуемого параметра (положительное или отрицательное ускорение) и многие другие.

До 60-х годов XX века при проектировании приводов считалось, что классическая механическая характеристика представляла непрерывную кривую, начиная с момента пускового, достигала  $M_k$  (максимального критического момента) и выходила на рабочий участок, достигая статической скорости. Характеристика строилась по формуле Клосса (рис.1.1), используя паспортные данные двигателя. Однако это справедливо только в статике. Переходные процессы и динамические механические характеристики будут существенно отличаться как в пусковых, так и в тормозных режимах от классических, учитывающих только механический переходный процесс. В тормозных режимах от классических, учитывающих только механический переходный процесс. С этим столкнулись на Уральских металлургических заводах. Например, на Нижне-Тагильском металлургическом комбинате в

течении первых 9 месяцев эксплуатации прокатного стана вышли из строя около тысячи рольганговых двигателей из-за излома валов, обрыва болтов и других неисправностей. Расчеты поломанных деталей на прочность указывали на воздействие знакопеременных динамических нагрузок, достигающих 4 – 5 кратных значений от  $M_k$ .

В процессе изучения установившихся электромагнитных процессов в асинхронных двигателях оказалось, что многофазные асинхронные двигатели имеют весомые преимущества перед трёхфазными. Многофазные асинхронные двигатели обладают высокой технологичностью и могут быть изготовлены на базе конструктивных элементов серийных трёхфазных асинхронных двигателей.

Однако характер динамических электромеханических переходных процессов протекающих в многофазном асинхронном двигателе в полной мере не изучен, и нуждается в дальнейшем исследовании, для применения в технологических процессах, где важны не только установившиеся характеристики системы.



# **1 Актуальность темы**

## **1.1 Назначение электропривода**

Электрическим приводом называется электромеханическое устройство, предназначенное для приведения в движение рабочих органов машин и управления их технологическими процессами, состоящее из передаточного, электродвигательного, преобразовательного и управляющего устройств.

Основное назначение электропривода как технологической электроустановки - преобразование электрической энергии в механическую энергию движения исполнительных органов машин и механизмов. Кроме функции преобразования энергии, электропривод несет функцию управления технологическим процессом приводимого в движение механизма. Электропривод связан с механизмом в единую электромеханическую систему, от физических свойств которой зависят ряд очень важных факторов, таких как производительность, динамические нагрузки, точность выполнения технологических операций. Открываются широкие возможности для формирования путем воздействия на систему управления электроприводом заданных законов движения рабочих органов машин, осуществления связанного автоматического управления взаимодействующими в технологическом процессе механизмами, оптимизации их работы по тем или иным критериям.

Для привода производственных механизмов наибольшее применение находят асинхронные короткозамкнутые двигатели. Асинхронные двигатели запитаны от сети переменного тока. Главным отличием от синхронной машины является то, что у данного двигателя частота вращения магнитного поля статора больше, нежели частота вращения магнитного поля ротора. Этот электродвигатель пользуется большой популярностью благодаря своей надежности и простоте в использовании.

Так же к достоинствам асинхронного двигателя стоит отнести:

доступность, невысокую стоимость. Высокие показатели КПД. Кроме того они очень распространены. Их можно найти в специализированных магазинах, рынках, интернет-порталах;

Надежность. Устройство поддается небольшим перегрузкам. Это необходимо, если двигатель используется на мощных производствах, где возможны перепады напряжения;

Легкость в использовании. Пуск выполняется простыми интуитивно понятными действиями. Для включения используется простая схема.

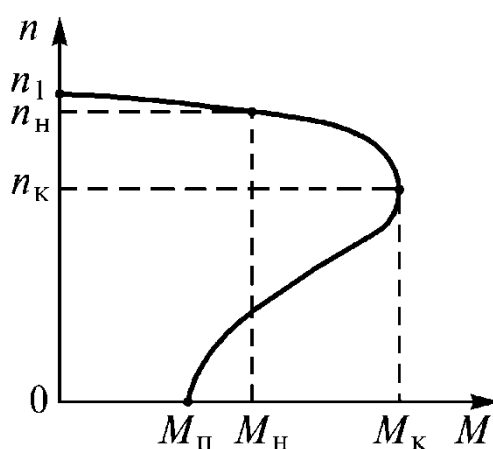


Рисунок 1.1 – Механическая характеристика асинхронного двигателя

## 1.2 Управление электроприводом

Электропривод сегодня является основой большинства подъемно-транспортных, обрабатывающих комплексов. Одним из способов их плавной работы является векторное управление асинхронным двигателем, преобразующим электрическую энергию в механическую – вращение приводного вала и связанных с ним механизмов. Что это такое, какие принципы при этом используются, постараемся разобраться далее.

Прежде чем переходить к модели, алгоритмам и системам управления электроприводом, нужно точно знать, что он собой представляет. Это позволяет выявить в его цепи такие моменты, которые можно будет использовать для

организации плавного изменения ключевых характеристик (частота/скорость вращения, напряжение). Соответственно, можно определить параметры контроллера, разработать технологические карты для его размещения в шкафу и обслуживания.

Работа любого асинхронного двигателя базируется на возбуждении на контактных обмотках магнитного поля при подаче электричества от шкафа управления. Оно возникает на статоре – неподвижной части двигателя, которая состоит из кольцевого сердечника (магнитопровода), собранного из отдельных металлических пластин. Каждая из них имеет концентрические пазы на внутренней стороне кольца, которые при совмещении образуют продольные пазы. Они служат для намотки проволоки, составляющей основу статорной обмотки.



Рисунок 1.2 – Двигатель асинхронный трёхфазный

Также асинхронный двигатель имеет подвижную часть – ротор, совмещенный с приводным валом. Он также имеет пластинчатый сердечник с пазами, но уже на внешней стороне. Вместо проволоки используются медные

прутки, которые по краям замыкаются пластинами (такой вариант двигателя называется с короткозамкнутым ротором).

За счет того, что частоты вращения магнитных полей статора и ротора отличаются, в обмотках последнего за счет индукции наводится электрический ток. Он, в свою очередь, побуждает электромагнитную силу, приводящую ротор в движение (вращение). Разница частот обычно называется скольжением. Его величина составляет порядка 2...10%.

Очевидно, что двигатель в обычном режиме работы от сети (электрического шкафа) имеет стандартную скорость/частоту вращения. Это ограничивает прямое его использование, вынуждая применять различные редукторные механизмы для понижения частоты до требуемой. Но даже тогда нет возможности динамично менять обороты, а вместе с ними, мощность, подачу, поскольку все равно остаются фиксированными частоты на выходе из двигателя и редуктора. Для расширения существующих рамок используют разные способы управления асинхронным двигателем (частотные, импульсные, фазные и т. д), которые можно разделить на две большие группы:

- Скалярное управление. Как правило, используется на приводных двигателях компрессорных, вентиляторных, насосных и прочих механизмов, где требуется контроль скорости вращения или любого другого параметра, связанного с датчиками;
- Векторное управление. Это усовершенствованная концепция, которая предполагает отдельный, независимый контроль, изменение момента и магнитного потока. Токосцепление ротора поддерживается на постоянном уровне, что позволяет сохранить максимальный показатель момента.

Отличие скалярного от векторного управления как раз заключается в возможности осуществления контроля возбуждения (потока). Фактически, асинхронный двигатель представляется как двигатель постоянного тока, имеющий независимые друг от друга обмотки.

### 1.3 Частотное регулирование асинхронного двигателя

Частотное регулирование угловой скорости вращения электропривода с асинхронным двигателем в настоящее время широко применяется, так как позволяет в широком интервале плавно изменять обороты вращения ротора как выше, так и ниже номинальных значений.

Частотные преобразователи являются современными, высокотехнологичными устройствами, обладающими большим диапазоном регулирования, имеющими обширный набор функций для управления асинхронными двигателями. Высочайшее качество и надежность дают возможность применять их в различных отраслях для управления приводами насосов, вентиляторов, транспортеров и т.д.

Современные преобразователи частоты тока/напряжения работают и по скалярному, и по векторному варианту, используя параметрические математические модели, реализованные в программном коде встроенного микроконтроллера. Частотные преобразователи электронного типа работают на тиристорных мостовых схемах и включают следующие основные компоненты:

- Выпрямитель – тиристорный или транзисторный мост, преобразующий переменный ток в постоянный;
- Инвертор – блок, работающий по обратному принципу, то есть преобразующий постоянный ток в переменный.

Частотные преобразователи по напряжению питания подразделяются на однофазные и трехфазные, а по конструктивному исполнению на электромашинные вращающиеся и статические. В электромашинных преобразователях переменная частота получается за счет использования обычных или специальных электрических машин. В статических частотных преобразователях изменение частоты питающего тока достигается за счет применения не имеющих движения электрических элементов.

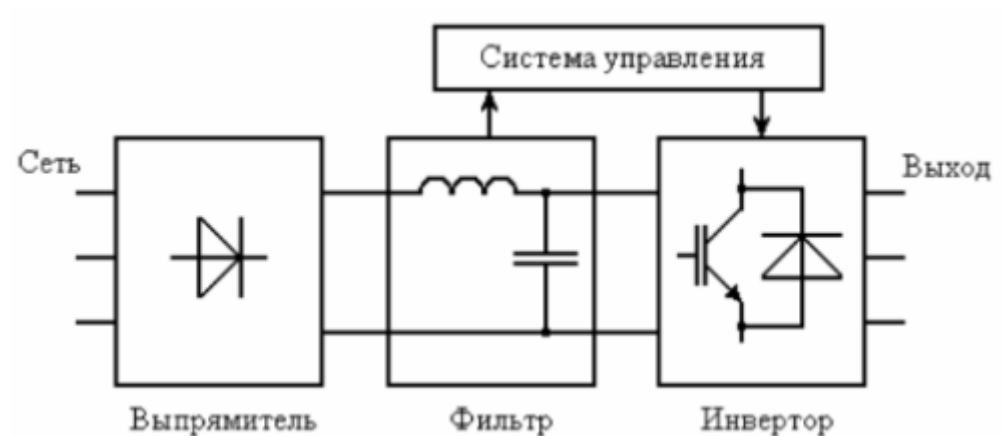


Рисунок 1.3 – Схема частотного преобразователя асинхронного двигателя



Рисунок 1.4 – Выходной сигнал преобразователя частоты

Преобразователи частоты для однофазной сети позволяют обеспечить электропривод производственного оборудования мощностью до 7,5 кВт. Особенностью конструкции современных однофазных преобразователей является то, что на входе имеется одна фаза с напряжением 220В, а на выходе - три фазы с тем же значением напряжения, что позволяет подключать к устройству трехфазные электродвигатели без применения конденсаторов.

Преобразователи частоты с питанием от трехфазной сети 380В выпускаются в диапазоне мощностей от 0,75 до 630 кВт. В зависимости от величины мощности устройства изготавливаются в полимерных комбинированных и металлических корпусах.

Самой популярной стратегией управления асинхронными электродвигателями является векторное управление. В настоящее время большинство частотных преобразователей реализуют векторное управление или даже векторное бездатчиковое управление (этот тренд встречается в частотных преобразователях, первоначально реализующих скалярное управление и не имеющих клемм для подключения датчика скорости).

Современные преобразователи частоты обладают разнообразным набором функциональных особенностей, например, имеют ручное и автоматическое управление скоростью и направлением вращения двигателя, а также встроенный потенциометр на панели управления. Наделены возможностью регулирования диапазона выходных частот от 0 до 800 Гц.

Преобразователи способны выполнять автоматическое управление асинхронным двигателем по сигналам с периферийных датчиков и приводить в действие электропривод по заданному временному алгоритму. Поддерживать функции автоматического восстановления режима работы при кратковременном прерывании питания. Выполнять управление переходными процессами с удаленного пульта и осуществлять защиту электродвигателей от перегрузок.

Связь между угловой скоростью вращения и частотой питающего тока вытекает из уравнения:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p_n} \quad (1.1)$$

При неизменном напряжении источника питания  $U_1$  и изменении частоты изменяется магнитный поток асинхронного двигателя. При этом для лучшего использования магнитной системы при снижении частоты питания необходимо пропорционально уменьшать напряжение, иначе значительно увеличатся намагничивающий ток и потери в стали.

Аналогично при увеличении частоты питания следует пропорционально увеличивать напряжение, чтобы сохранить магнитный поток постоянным, так как в противном случае (при постоянном моменте на валу) это приведет к нарастанию тока ротора, перегрузке его обмоток по току, снижению максимального момента.

При постоянном моменте статической нагрузки ( $M_c = \text{const}$ ) напряжение должно регулироваться пропорционально его частоте:

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} \quad (1.2)$$

При моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const} \quad (1.3)$$

На рисунках ниже представлены упрощенная схема подключения и механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании угловой скорости.



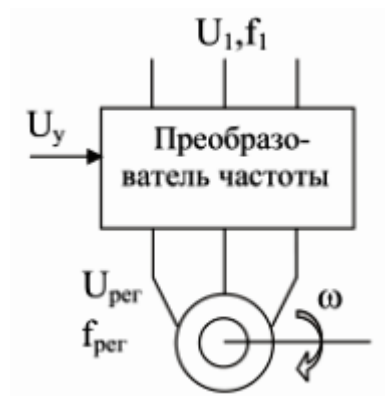


Рисунок 1.5 – Схема подключения частотного преобразователя к асинхронному электродвигателю

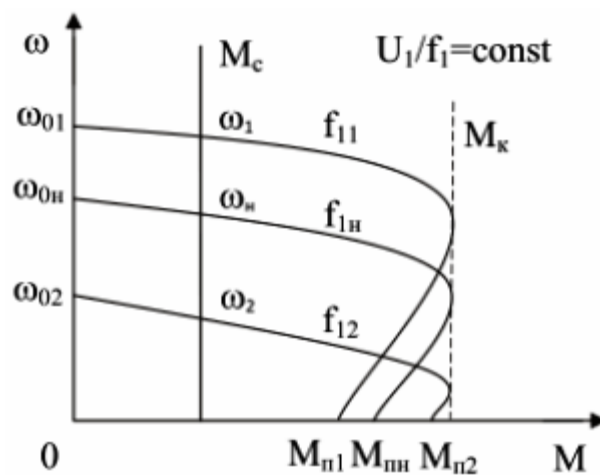


Рисунок 1.6 – Характеристики для нагрузки с постоянным статическим моментом сопротивления

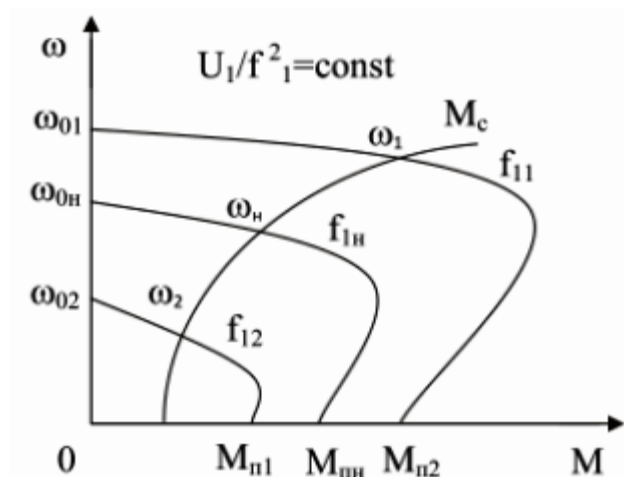


Рисунок 1.7 – Характеристики для нагрузки вентиляторного характера

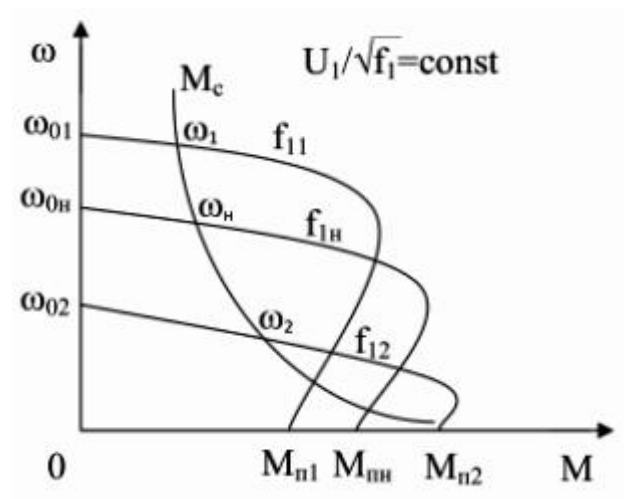


Рисунок 1.8 – Характеристики при статическом моменте нагрузки обратно пропорциональном угловой скорости вращения

Частотное регулирование скорости асинхронного двигателя позволяет изменять угловую скорость вращения в диапазоне - 20...30 к 1. Регулирование скорости асинхронного двигателя вниз от основной осуществляется практически до нуля.

При изменении частоты питающей сети верхний предел частоты вращения асинхронного двигателя зависит от ее механических свойств, тем более что на частотах выше номинальной асинхронный двигатель работает с лучшими энергетическими показателями, чем на пониженных частотах. Поэтому, если в системе привода используется редуктор, это управление двигателем по частоте следует производить не только вниз, но и вверх от номинальной точки, вплоть до максимальной частоты вращения, допустимой по условиям механической прочности ротора.

При увеличении оборотов вращения двигателя выше указанного значения в его паспорте частота источника питания не должна превышать номинальную не более чем 1,5 - 2 раза.

Частотный способ является наиболее перспективным для регулирования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Потери мощности при таком регулировании невелики, поскольку не сопровождаются увеличением скольжения. Получаемые при этом механические характеристики обладают высокой жесткостью. Кроме того, в замкнутых системах можно управлять двигателем, достигая минимума потерь в нем или минимума потребляемого двигателем тока или экстремума других энергетических показателей, так как имеется возможность регулировать напряжение в функции нагрузки. Частотное регулирование угловой скорости обычно плавное, бесступенчатое. Но оно требует применения относительно сложного преобразователя.

Большим достоинством частотного регулирования является возможность реализации высоких регулировочных свойств, не уступающих приводу постоянного тока, в электроприводе с бесконтактным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором — наиболее простым, надежным и дешевым электрическим двигателем.

## **2 Математическое описание электропривода переменного тока**

### **2.1 Математическое описание асинхронного двигателя**

В связи с постоянным расширением области применения машин переменного тока в регулируемом электроприводе рассматриваются модели и задачи анализа электрических машин, как элементов сложных замкнутых электромеханических систем. Разрабатываются математические модели и методы исследования свойств электрических машин, ориентированные на задачи управления и оптимизации их режимов работы по различным критериям. Модель машины призвана служить инструментом поиска ее оптимальных режимов и определения обеспечивающих эти режимы величин контролируемых внешних воздействий на машину. Последние превращаются таким образом из заданных в искомые функции времени и координат состояния системы, а модель – в инструмент синтеза ее управляющей части.

При решении каждой конкретной задачи модель должна быть максимально упрощена за счет отбрасывания второстепенных факторов. В связи со сложностью алгоритмов поиска оптимальных управлений и фактором нелинейности машины как объекта управления удачный выбор модели объекта является залогом успешного решения задачи. Поэтому в распоряжении исследователя должен быть набор моделей, наиболее хорошо приспособленных для решения различных конкретных задач.

В качестве математического описания трехфазного асинхронного двигателя используем математическое описание обобщенной асинхронной машины, которая базируется на известных законах.

Уравнения равновесия э.д.с. на обмотках статора и ротора базируются на втором законе Кирхгофа.

Для статора

Для ротора:

$$\begin{cases} u_{s1} = i_{s1} \cdot R_{s1} + \frac{d\psi_{s1}}{dt}, \\ u_{s2} = i_{s2} \cdot R_{s2} + \frac{d\psi_{s2}}{dt}, \\ u_{s3} = i_{s3} \cdot R_{s3} + \frac{d\psi_{s3}}{dt}. \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} 0 = i_{r1} \cdot R_{r1} + \frac{d\psi_{r1}}{dt}, \\ 0 = i_{r2} \cdot R_{r2} + \frac{d\psi_{r2}}{dt}, \\ 0 = i_{r3} \cdot R_{r3} + \frac{d\psi_{r3}}{dt}. \end{cases} \quad (2.2)$$

В уравнениях (2.1, 2.2) фигурируют мгновенные напряжения, токи и потокосцепления статора и ротора, а также активные сопротивления обмоток. Обычно обмотки выполняются симметричными, и поэтому  $R_{s1} = R_{s2} = R_{s3} = r_s$  – активное сопротивление статорной обмотки,  $R_{r1} = R_{r2} = R_{r3} = r_r$  – активное сопротивление роторной обмотки.

Вторым используемым законом является закон Ампера, который связывает потокосцепления обмоток с токами, протекающими по обмоткам:

Для статора

$$\begin{cases} \psi_{s1} = L_s \cdot i_{s1} + L_{s1,2} \cdot i_{s2} + L_{s1,3} \cdot i_{s3} + L_{s1,r1} \cdot A_1 \cdot i_{r1} + L_{s1,r2} \cdot A_2 \cdot i_{r2} + L_{s1,r3} \cdot A_3 \cdot i_{r3}, \\ \psi_{s2} = L_{s2,1} \cdot i_{s1} + L_s \cdot i_{s2} + L_{s2,3} \cdot i_{s3} + L_{s2,r1} \cdot A_3 \cdot i_{r1} + L_{s2,r2} \cdot A_1 \cdot i_{r2} + L_{s2,r3} \cdot A_2 \cdot i_{r3}, \\ \psi_{s3} = L_{s3,1} \cdot i_{s1} + L_{s3,2} \cdot i_{s2} + L_s \cdot i_{s3} + L_{s3,r1} \cdot A_2 \cdot i_{r1} + L_{s3,r2} \cdot A_3 \cdot i_{r2} + L_{s3,r3} \cdot A_1 \cdot i_{r3}. \end{cases} \quad (2.3)$$

Для ротора

$$\begin{cases} \psi_{r1} = L_r \cdot i_{r1} + L_{r1,2} \cdot i_{r2} + L_{r1,3} \cdot i_{r3} + L_{r1,s1} \cdot A_1 \cdot i_{s1} + L_{r1,s2} \cdot A_3 \cdot i_{s2} + L_{r1,s3} \cdot A_2 \cdot i_{s3}, \\ \psi_{r2} = L_{r2,1} \cdot i_{r1} + L_r \cdot i_{r2} + L_{r2,3} \cdot i_{r3} + L_{r2,s1} \cdot A_2 \cdot i_{s1} + L_{r2,s2} \cdot A_1 \cdot i_{s2} + L_{r2,s3} \cdot A_3 \cdot i_{s3}, \\ \psi_{r3} = L_{r3,1} \cdot i_{r1} + L_{r3,2} \cdot i_{r2} + L_r \cdot i_{r3} + L_{r3,s1} \cdot A_3 \cdot i_{s1} + L_{r3,s2} \cdot A_2 \cdot i_{s2} + L_{r3,s3} \cdot A_1 \cdot i_{s3}. \end{cases} \quad (2.4)$$

Симметричные уравнения для определения потокосцеплений показывают, что потокосцепление каждой обмотки зависит от токов во всех

обмотках; эти зависимости проявляются через взаимоиндукцию. В уравнениях (2.3, 2.4)  $L_{s1}$ ,  $L_{s2}$ ,  $L_{s3}$ ,  $L_{r1}$ ,  $L_{r2}$ ,  $L_{r3}$  являются собственными индуктивностями соответствующих обмоток, все остальные – взаимоиндуктивностями между соответствующими обмотками.

Третьим законом, лежащим в основе анализа, является второй закон Ньютона – закон равновесия моментов на валу машины:

$$J \frac{d\vec{\omega}_m}{dt} = \vec{M} - \vec{M}_H, \quad (2.5)$$

где  $J$  (кг м<sup>2</sup>) – момент инерции на валу машины, учитывающий инерционность как самой машины, так и приведенной к валу инерционности рабочего механизма и редуктора;

$\vec{\omega}_m$  (рад/с) – угловая скорость вала машины;

$\vec{M}_H$  (Нм) – момент рабочего механизма, приведенный к валу, в общем случае он может быть функцией скорости и угла поворота.

Четвертым и последним законом, лежащим в основе анализа машины, является закон, сформулированный Ленцем, как правило левой руки. Этот закон связывает векторные величины момента, потокосцепления и тока:

$$\vec{M} = k(\vec{\psi} \cdot \vec{i}). \quad (2.6)$$

Следует сразу подчеркнуть, что, несмотря на полное и строгое математическое описание, использование уравнений (2.1) – (2.6) для исследования машины встречает серьезные трудности.

Перечислим основные:

- в уравнениях (2.5 и 2.6) фигурируют векторные величины, а в уравнениях (2.1 и 2.4) скалярные;
- количество взаимосвязанных уравнений равно 16, а количество

коэффициентов - 44;

- коэффициенты взаимоиндукции между обмотками статора и ротора в уравнениях (2.3 и 2.4) являются функцией угла поворота ротора относительно статора, то есть данные уравнения являются уравнениями с переменными коэффициентами;
- уравнение (2.6) является нелинейным, так как в нем перемножаются переменные.

На пути упрощения математического описания асинхронной машины используют метод пространственного вектора, который позволил существенно упростить и сократить вышеприведенную систему уравнений; метод позволяет связать уравнения (2.1 – 2.6) в единую систему с векторными переменными состояния. Суть метода состоит в том, что мгновенные значения симметричных трехфазных переменных состояния (напряжения, токи, потокосцепления) можно математически преобразовать так, чтобы они были представлены одним пространственным вектором. Это математическое преобразование имеет вид (например, для тока статора):

$$\vec{i} = \frac{2}{3}(i_A + \vec{a}i_B + \vec{a}^2 i_C), \quad (2.7)$$

где  $\vec{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ ,  $\vec{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$  – векторы, учитывающие пространственное смещение обмоток;

$$i_A = I_m \cos \omega t, \quad i_B = I_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}), \quad i_C = I_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad - \quad \text{трехфазная}$$

симметричная система токов статора.

Подставив в уравнения (2.7) значение мгновенных токов, найдем математическое описание пространственного вектора статорного тока:

$$\vec{i}_s = \frac{2}{3} I_m (\cos \omega t + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + e^{j\frac{4\pi}{3}} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})). \quad (2.8)$$

Геометрическая интерпретация пространственного вектора тока, представленная на рисунке (1.1) – это вектор на комплексной плоскости с модулем (длиной)  $I_m$ , вращающийся с угловой скоростью  $\omega$  в положительном направлении. Проекции вектора  $\vec{i}_s$  на фазные оси A, B, C определяют мгновенные токи в фазах. Аналогично пространственными векторами можно представить все напряжения, токи и потокосцепления, входящие в уравнения (2.1) – (2.4).

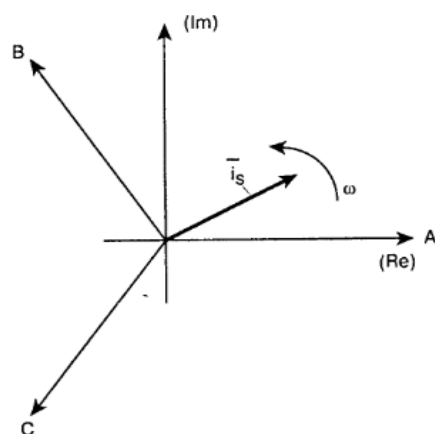


Рисунок 2.1 – Пространственный вектор тока

Упрощение уравнений.

Шаг первый. Для преобразования уравнений (2.1) – (2.4) в мгновенных значениях к уравнениям в пространственных векторах умножим их на выражения: первые уравнения на  $\frac{2}{3}$ , вторые – на  $\frac{2}{3}a$ , третьи –  $\frac{2}{3}a^2$ , – и сложим отдельно для статора и ротора. Тогда получим:



$$\begin{cases} \vec{u}_S = R_S \vec{i}_S + \frac{d\vec{\psi}_S}{dt}, \\ \vec{u}_R = R_R \vec{i}_R + \frac{d\vec{\psi}_R}{dt}, \\ \vec{\psi}_S = L_S \vec{i}_S + L_m(\theta) \vec{i}_R, \\ \vec{\psi}_R = L_m(\theta) \vec{i}_S + L_R \vec{i}_R, \end{cases} \quad (2.9)$$

где  $L_S, L_R$  – собственные индуктивности статора и ротора;

$L_m(\theta)$  – взаимная индуктивность между статором и ротором.

Таким образом, вместо двенадцати уравнений (2.1) – (2.4) получено лишь четыре уравнения (2.9).

Шаг второй. Переменные коэффициенты взаимной индукции в уравнениях для потокосцеплений (2.9) являются результатом того, что уравнения равновесия э.д.с. для статора записаны в неподвижной системе координат, связанной со статором, а уравнения равновесия э.д.с. для ротора записаны во вращающейся системе координат, связанной с ротором. Метод пространственного вектора позволяет записать эти уравнения в единой системе координат, вращающейся с произвольной скоростью  $\omega_k$ . В этом случае уравнения (2.9) преобразуются к виду:

$$\begin{cases} \bar{u}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + j\omega_k \bar{\psi}_s, \\ \bar{u}_R = R_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\omega_k - p_n \omega_m) \bar{\psi}_R, \\ \bar{\psi}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_R, \\ \bar{\psi}_R = L_m \bar{i}_s + L_R \bar{i}_R \end{cases} \quad (2.10)$$

где  $\omega = p_n \omega_m$ ,

$p_n$  – число пар полюсов в машине.

В уравнениях (2.10) все коэффициенты являются величинами

постоянными, имеют четкий физический смысл и могут быть определены по паспортным данным двигателя, либо экспериментально.

Шаг третий. Этот шаг связан с определением момента. Момент в уравнении (2.6) является векторным произведением любой пары векторов. Таких пар может быть шесть  $(\vec{i}_s, \vec{i}_R); (\vec{\psi}_s, \vec{\psi}_R); (\vec{i}_s, \vec{\psi}_s); (\vec{i}_R, \vec{\psi}_R); (\vec{i}_R, \vec{\psi}_s); (\vec{i}_s, \vec{\psi}_R)$ . Часто в рассмотрение вводится потокосцепление взаимной индукции  $\vec{\psi}_m = L_m(\vec{i}_s + \vec{i}_R)$ . В этом случае появляется ещё четыре возможности представления электромагнитного момента машины через следующие пары:  $(\vec{i}_s, \vec{\psi}_m); (\vec{i}_R, \vec{\psi}_m); (\vec{\psi}_s, \vec{\psi}_m); (\vec{\psi}_R, \vec{\psi}_m)$ . После выбора той или иной пары уравнение момента приобретает определенность, а количество уравнений в системе (2.10) сокращается до двух. Кроме того, в уравнениях (2.5) и (2.6) векторные величины момента и скорости могут быть заменены их модульными значениями. Это является следствием того, что пространственные векторы токов и потокосцеплений расположены в плоскости, перпендикулярной оси вращения, а векторы момента и угловой скорости совпадают с осью. В качестве примера покажем запись уравнений момента через некоторые пары переменных состояния машины.

$$\begin{cases} M = \frac{3}{2} p_n L_m \cdot \text{Mod}(\overline{i_s} \times \overline{i_R}), \\ M = \frac{3}{2} p_n L_m \cdot \text{Mod}(\overline{\psi_s} \times \overline{i_s}), \\ M = \frac{3}{2} p_n L_m \cdot \text{Mod}(\overline{\psi_R} \times \overline{i_s}). \end{cases} \quad (2.11)$$

Шаг четвертый. На этом этапе уравнения (2.5), (2.10) и (2.11) приводятся к безразмерным (относительным) величинам. В качестве основных базовых величин выбираются амплитудные номинальные значения фазного напряжения и тока, а также номинальное значение угловой частоты:

$$U_b = \sqrt{2}U_1, \quad I_b = \sqrt{2}I_1, \quad \omega_b = \omega_1 = 2\pi f_1, \quad (2.12)$$

на этой основе определяются базовые значения всех переменных и коэффициентов, входящих в уравнения, а также базового времени:

$$R_b = \frac{U_b}{I_b}, \quad L_b = \frac{U_b}{\omega_b I_b}, \quad \Psi_b = \frac{U_b}{\omega_b}, \quad M_b = \frac{3}{2} p_n \frac{U_b I_b}{\omega_b}, \quad t_b = \frac{1}{\omega_b}. \quad (2.13)$$

В дальнейшем используются уравнения только в относительных величинах. Обобщенная система уравнений для описания асинхронной машины принимает вид:

$$\begin{cases} \bar{u}_S = r_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\psi}_S}{dt} + j\omega_k \bar{\psi}_S, \\ \bar{u}_R = r_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\omega_k - p_n \nu) \bar{\psi}_R, \\ \bar{\psi}_S = x_S \bar{i}_S + x_m \bar{i}_R, \\ \bar{\psi}_R = x_m \bar{i}_S + x_R \bar{i}_R, \\ m = k \text{ Mod}(\bar{\psi}_i \times \bar{i}_k), \\ \bar{T}_m \frac{d\nu}{dt} = m - m_H. \end{cases} \quad (2.14)$$

В этих уравнениях все переменные относительные, полученные как результат деления реальных значений на базовые, все коэффициенты также безразмерные, полученные аналогично. Переменные и параметры в относительных единицах:

$\bar{u} = \frac{\bar{u}}{U_b}, \quad \bar{i} = \frac{\bar{i}}{I_b}, \quad \bar{\psi} = \frac{\bar{\psi}}{\Psi_b}$  - относительные электромагнитные переменные состояния,

$m = \frac{M}{M_b}$  - относительный момент на валу машины,

$r_s = \frac{R_s}{R_b}$ ,  $r_R = \frac{R_R}{R_b}$ ,  $x_s = \frac{\omega_b L_s}{R_b}$ ,  $x_R = \frac{\omega_b L_R}{R_b}$ ,  $x_m = \frac{\omega_b L_m}{R_b}$ ,  $\bar{T}_m = \frac{J\omega_b^2}{M_b}$  - относительные параметры.

Введение относительных величин существенно сокращает время моделирования и позволяет устранить многие проблемы при моделировании.

## 2.2 Преобразование координат

Для упрощения задачи анализа и разработки законов управления, используют приведение к различным системам координат, удобных для решения той или иной задачи.

Математическая основа преобразования координат проиллюстрирована на рисунке 2.2.

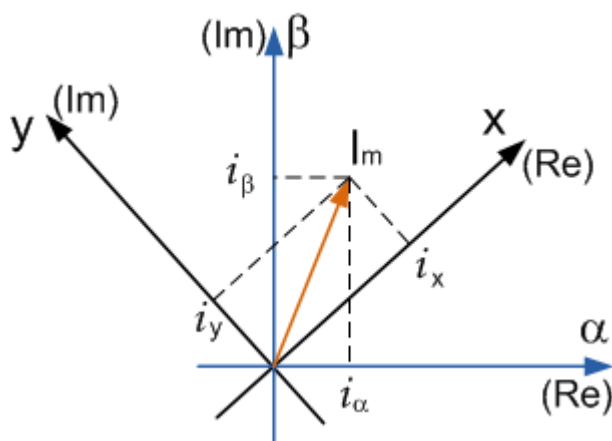


Рисунок 2.2 – Преобразование координат

В неподвижной системе координат  $(\alpha, \beta)$  вектор тока (напряжения, потокосцепления) может быть представлен в алгебраической и показательной форме

$$\overline{i_n} = i_a + j i_\beta = I_m e^{j\psi_1} \quad (2.15)$$

Аналогично в системе вращающихся координат (х, у) тот же самый вектор может быть представлен в виде:

$$\overline{i_{вр}} = i_x + j i_y = I_m e^{j(\Psi_1 - \omega_k t)} = \overline{i_n} e^{-j\omega_k t} \quad (2.16)$$

Отсюда легко получить уравнения перехода от неподвижной системы координат к вращательной и наоборот:

$$\begin{cases} i_x = i_\alpha \cos(\omega_k t) + i_\beta \sin(\omega_k t), \\ i_y = i_\beta \cos(\omega_k t) - i_\alpha \sin(\omega_k t), \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\begin{cases} i_\alpha = i_x \cos(\omega_k t) - i_y \sin(\omega_k t), \\ i_\beta = i_y \cos(\omega_k t) + i_x \sin(\omega_k t). \end{cases}$$

### 2.3 Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором

Описание асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (АКЗ) получается из описания обобщенной машины при положении, что  $u_R=0$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{u}_S = R_S \overline{i}_S + \frac{d\overline{\psi}_S}{dt} + j\omega_k \overline{\psi}_S, \\ 0 = R_R \overline{i}_R + \frac{d\overline{\psi}_R}{dt} + j(\omega_k - p_n \nu) \overline{\psi}_R, \\ \overline{\psi}_S = L_S \overline{i}_S + L_m \overline{i}_R, \\ \overline{\psi}_R = L_m \overline{i}_S + L_R \overline{i}_R, \\ M = \frac{3}{2} p_n L_m \cdot \text{Mod}(\overline{\psi}_S \times \overline{i}_S), \\ j \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H. \end{array} \right. \quad (2.18)$$

Исключив из системы (2.15)  $\overline{\psi}_S$  и  $\overline{i}_R$ , получим

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{u}_S = r \overline{i}_S + L'_S \frac{d\overline{i}_S}{dt} + j\omega_k L'_S \overline{i}_S - \frac{k_R}{T_R} \overline{\psi}_R + jk_R p_n \omega_m \overline{\psi}_R, \\ 0 = -k_R R_R \overline{i}_S + \frac{1}{T_R} \overline{\psi}_R + \frac{d\overline{\psi}_R}{dt} + j(\omega_k - p_n \nu) \overline{\psi}_R, \\ M = \frac{3}{2} p_n L_m \cdot \text{Mod}(\overline{\psi}_S \times \overline{i}_S), \\ j \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H. \end{array} \right. \quad (2.19)$$

$$\text{где } r = (R_S + k_R^2 R_R); \quad L'_S = \left( L_S - \frac{L_m^2}{L_R} \right); \quad k_R = \frac{L_m}{L_R}; \quad T_R = \frac{L_R}{R_R}.$$

## 2.4 Математическое описание асинхронного короткозамкнутого двигателя во вращающейся системе координат

При рассмотрении модели электрической машины для задачи анализа, как элемента замкнутой электромеханической системы математическое описание представляют во вращающейся с относительной угловой скоростью

$\omega$  системе координат с вещественной осью  $x$  и мнимой осью  $y$ . Структурная схема АКЗ и ее модель зависит от выбора базового вектора, который определяет скорость вращения координат. За базовый вектор принимается тот, который при анализе совмещается с одной из осей системы координат.

Основой для синтеза асинхронных систем с векторным управлением является математическое описание АКЗ во вращающейся системе координат, совмещенной с потокосцеплением ротора как при питании АКЗ от источника напряжения, так и при питании АКЗ от источника тока.

Тогда при питании статорных обмоток от источника напряжения получим систему уравнений в операторной форме:

$$\begin{cases} u_{Sx} = r(1 + T_s s)i_{Sx} - \omega_k L'_S i_{Sy} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx} - k_R p_n \omega \psi_{Ry}, \\ u_{Sy} = r(1 + T_s p)i_{Sy} + \omega_k L'_S i_{Sx} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Ry} + k_R p_n \omega \psi_{Rx} \\ 0 = -k_R R_R i_{Sx} + \frac{1}{T_R} \psi_{Rx} + p \psi_{Rx} - (\omega_k - p_n \omega) \psi_{Ry}, \\ 0 = -k_R R_R i_{Sy} + \frac{1}{T_R} \psi_{Ry} + p \psi_{Ry} + (\omega_k - p_n \omega) \psi_{Rx}, \\ m = 1.5 p_n k_R (\psi_{Rx} i_{Sy} - \psi_{Ry} i_{Sx}), \\ Jp\omega = M - M_H. \end{cases} \quad (2.20)$$

Структурная схема АКЗ и ее модель зависит от выбора базового вектора, который определяет скорость вращения координат.

Если за базовый вектор принять вектор  $\overline{u_s}$ , то система координат будет вращаться со скоростью  $\omega_1$ , равной угловой частоте напряжения питания. Кроме того, если совместить вектор  $\overline{u_s}$  с осью  $x$  вращающейся системы координат, то в уравнениях (2.17) следует принять  $u_{sx} = U_1$ ,  $u_{sy} = 0$ .

$$\begin{cases}
U_1 = r(1 + T_S' p) i_{Sx} - \omega_1 L_S' i_{Sy} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx} - k_R p_n \omega_m \psi_{Ry}, \\
0 = r(1 + T_S' p) i_{Sy} + \omega_1 L_S' i_{Sx} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Ry} + k_R p_n \omega_m \psi_{Rx}, \\
0 = -k_R R_R i_{Sx} + \frac{1}{T_R} \psi_{Rx} + p \psi_{Rx} - (\omega_1 - p_n \omega_m) \psi_{Ry}, \\
0 = -k_R R_R i_{Sy} + \frac{1}{T_R} \psi_{Ry} + p \psi_{Ry} + (\omega_1 - p_n \omega_m) \psi_{Rx}, \\
m = 1.5 p_n k_R (\psi_{Rx} i_{Sy} - \psi_{Ry} i_{Sx}), \\
J p \omega_m = M - M_H.
\end{cases} \quad (2.21)$$

Структурная схема, построенная по уравнениям (2.18) представлена на рисунке 2.3 Результаты моделирования представлены на рисунках 2.4 - 2.5.

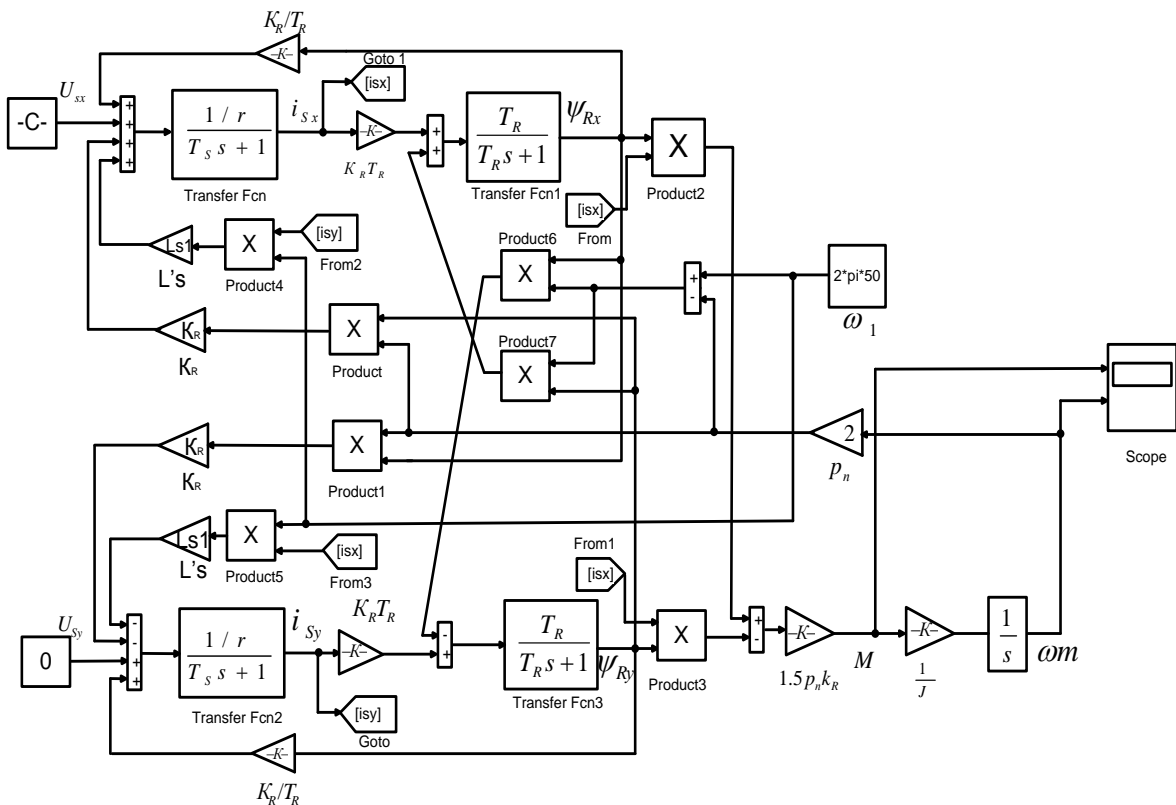


Рисунок 2.3 – Структурная схема асинхронного короткозамкнутого двигателя во вращающейся системе координат с базовым вектором напряжения



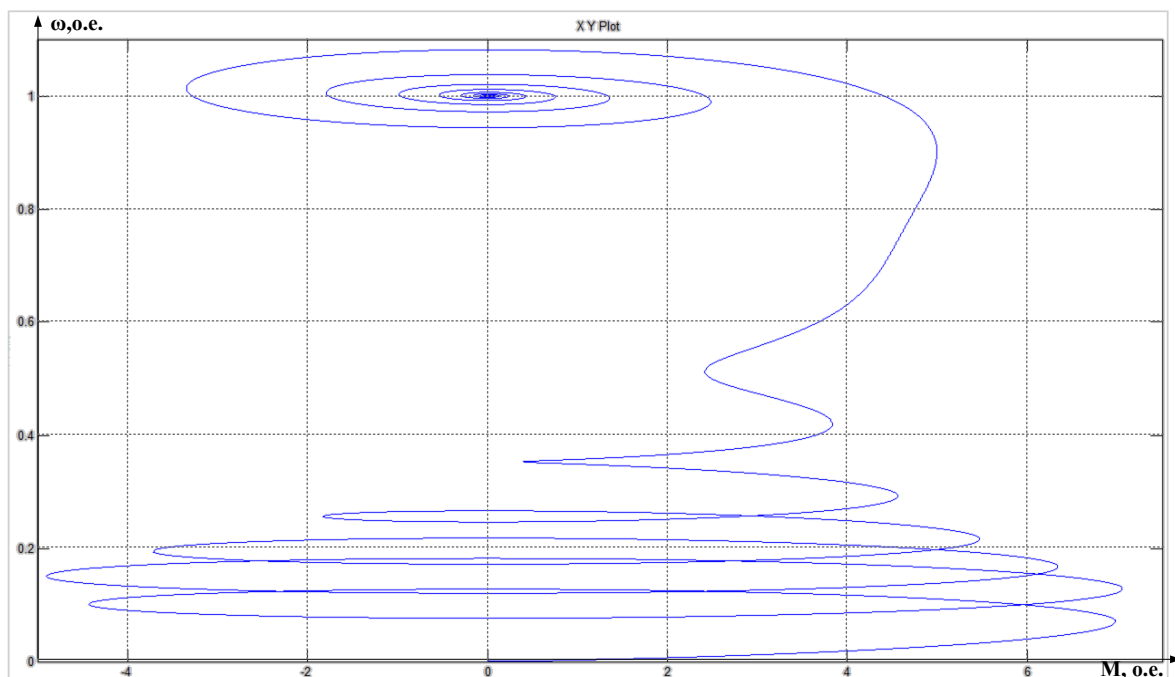


Рисунок 2.4 – Динамическая механическая характеристика пуска АД

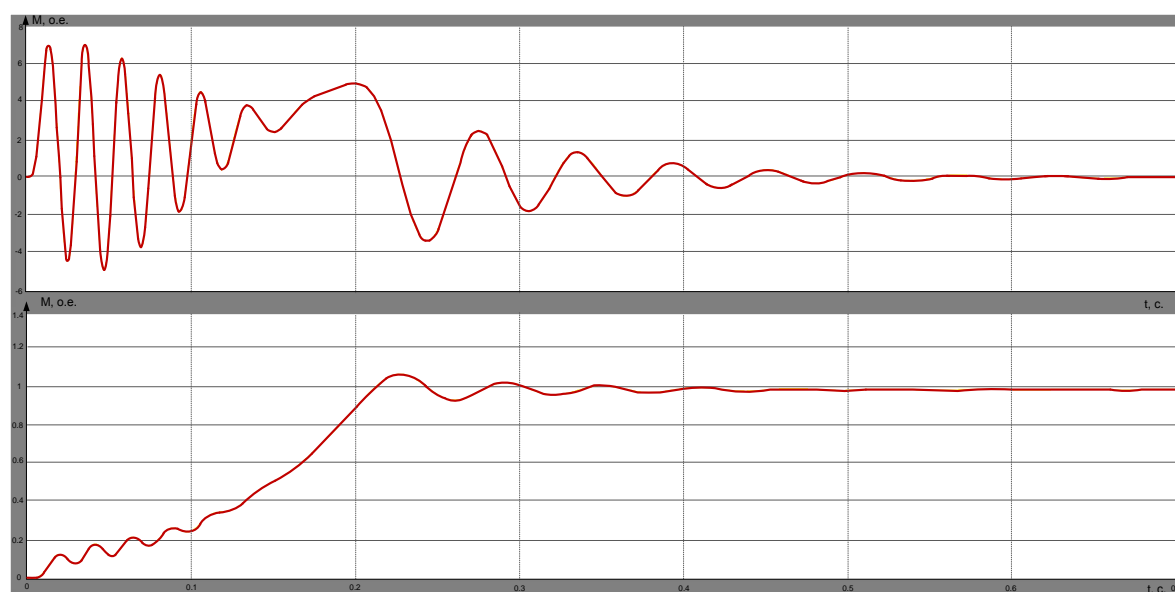


Рисунок 2.5 – Осциллограммы момента и скорости двигателя при пуске

Сравнивая результаты моделирования в неподвижной и во вращающейся системе координат, можно сделать вывод об их полной идентичности. При этом конечно нужно помнить, что в установившемся режиме ток и потокосцепление во вращающейся системе координат являются постоянными величинами. Это доказывает, что для анализа собственно электрической машины выбор системы

координат не играет роли. Однако для синтеза и анализа электропривода выбор системы координат является решающим. Это обстоятельство особенно проявляется при синтезе параметров регуляторов и при моделировании всей системы электропривода в пакете Simulink, так как при решении задач в это пакете существуют ограничения, которые можно обойти только при правильном выборе системы координат.[8]

В пакете Simulink имеется стандартная модель асинхронного короткозамкнутого двигателя. Сравним полученную нами модель со стандартным блоком пакета Simulink Asynchronous Machine.

Осциллограммы переходных процессов при пуске и подключении нагрузки, полученные на модели (рис.2.7), представлены на рисунке 2.6.

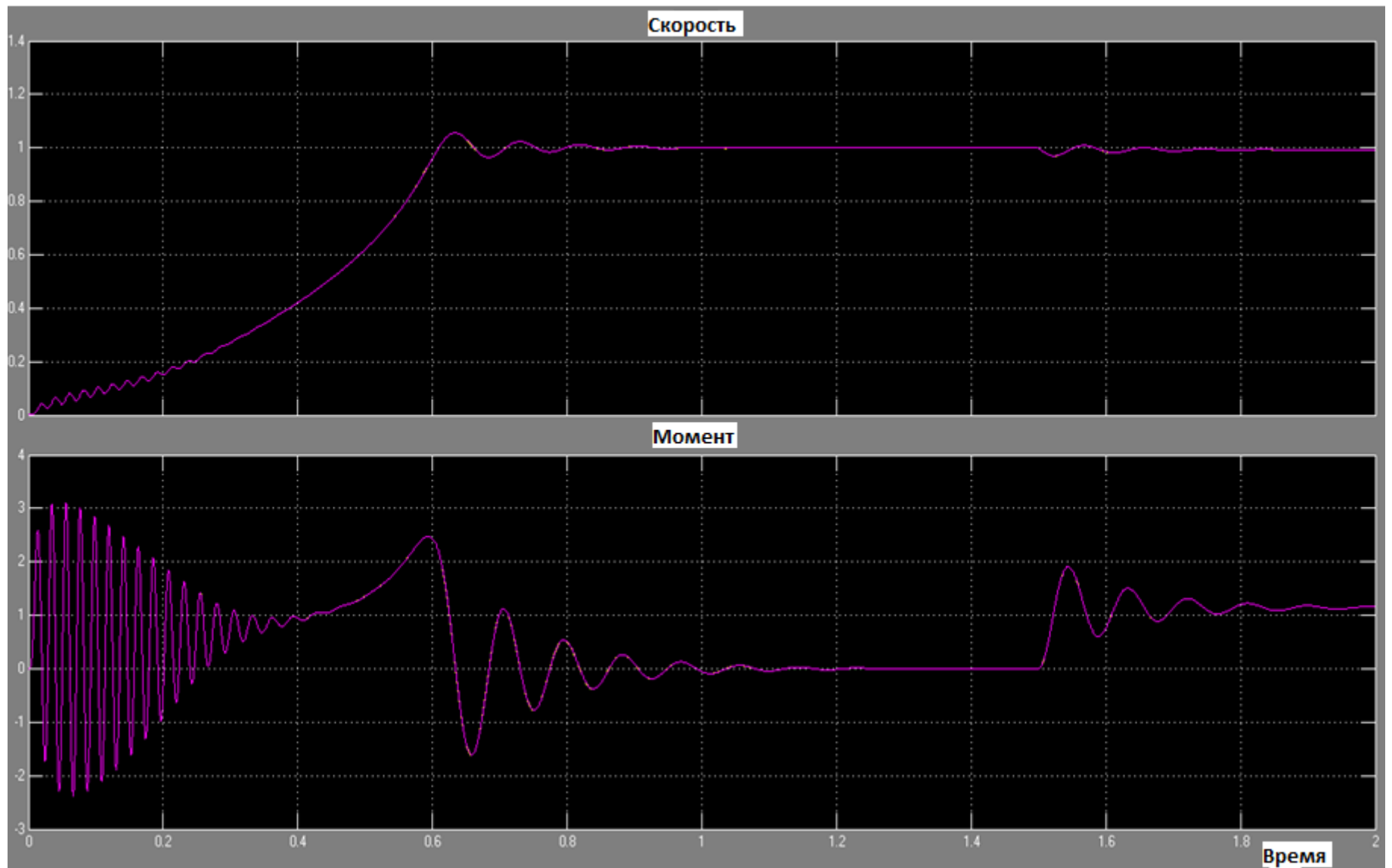


Рисунок 2.6 - Результаты моделирования

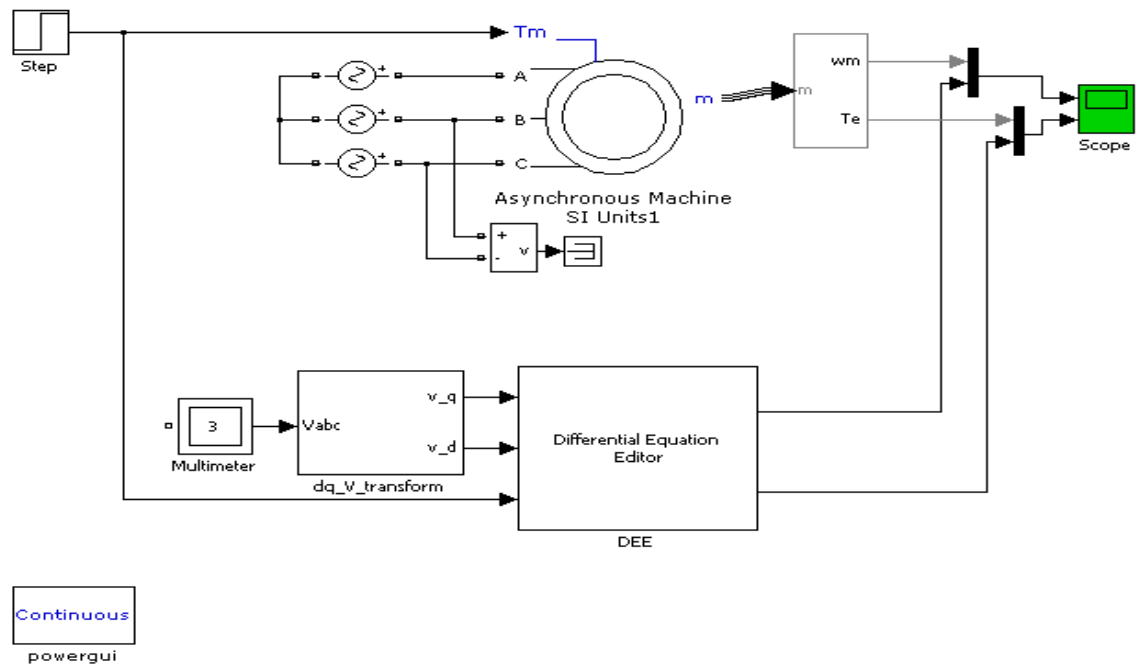


Рисунок 2.7 - Модель, со стандартным блоком пакета Simulink

По полученным данным делаем вывод, что созданная нами модель и стандартный блок Asynchronous Machine в пакете Simulink дают полностью идентичные переходные процессы.

### **3 Исследование многофазного асинхронного двигателя**

#### **3.1 Моделирование шестифазного асинхронного короткозамкнутого двигателя в собственной системе координат**

Несмотря на то, что в сравнении с другими электродвигателями асинхронный двигатель обладает принципиально важными преимуществами, область применения современных трёхфазных асинхронных инверторных электроприводов из-за ряда их серьёзных недостатков сильно ограничена. Такая противоречивость качеств требует отыскания принципов построения и управления асинхронных инверторных электроприводов, обеспечивающих максимальное использование преимуществ асинхронных двигателей. Эта проблема может быть решена только на основе глубоких исследований электромагнитных процессов в асинхронном двигателе при питании его от автономного инвертора напряжения или тока.

Автономность структуры асинхронного инверторного электропривода делает возможным увеличение числа фаз, которое при несинусоидальности напряжений (токе) асинхронного инвертора и несинусоидальном распределении индукции в зазоре асинхронного двигателя значительно улучшает характеристики асинхронного инверторного электропривода. В настоящее время ведётся исследование трёхфазных асинхронных инверторных электроприводов, но разработанные для этого методы оказываются неприемлемы при изучении процессов в системах с числом фаз более трёх. Поэтому для успешного решения проблемы повышения качества асинхронного инверторного электропривода необходимы, в первую очередь, разработка точных методов анализа электромагнитных процессов и установление основных закономерностей совместного влияния числа фаз, законов управления и исполнения на характеристики асинхронного инверторного электропривода.

При исследовании трёхфазных асинхронных двигателей применяются

методы, основанные на линейных преобразованиях уравнений (эквивалентной двухфазной машины, результирующих векторов и др.), которые оказываются несправедливыми при числе фаз более четырёх из-за нарушения эквивалентности этих преобразований. Известно что Т- и Г-образные схемы замещения асинхронных двигателей лишь приближённо отражают происходящие в нём процессы и погрешность замещения возрастает с уменьшением частоты питающего напряжения. Это приводит к существенным неточностям в представлениях о взаимосвязях конструктивных параметров асинхронных двигателей, его характеристик и управляемости, что весьма важно для повышения качества асинхронного инверторного электропривода. Следовательно, необходима разработка методов, и в первую очередь аналитических, которые были бы лишены этих недостатков. Очевидно, что наиболее точными могут быть методы, позволяющие непосредственно решать полные дифференциальные уравнения без привлечения искусственных приёмов. Именно такой подход положен в основу данной главы.

Система дифференциальных уравнений асинхронного двигателя обладает особым свойством симметричности, отражающим действительное взаимодействие процессов в многофазных системах, использование которого позволило впервые получить динамические механические характеристики многофазного асинхронного двигателя.

Представим мат. описание асинхронного короткозамкнутого двигателя в виде систем уравнений.

Уравнения напряжений для статорной и роторной цепи асинхронного короткозамкнутого двигателя имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{s1} = \frac{d\psi_{s1}}{dt} + R_{s1}i_{s1}, \\ U_{s2} = \frac{d\psi_{s2}}{dt} + R_{s2}i_{s2}, \\ U_{s3} = \frac{d\psi_{s3}}{dt} + R_{s3}i_{s3}, \\ U_{s4} = \frac{d\psi_{s4}}{dt} + R_{s4}i_{s4}, \\ U_{s5} = \frac{d\psi_{s5}}{dt} + R_{s5}i_{s5}, \\ U_{s6} = \frac{d\psi_{s6}}{dt} + R_{s6}i_{s6}. \end{array} \right. \quad (3.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{r1} = \frac{d\psi_{r1}}{dt} + R_{r1}i_{r1}, \\ U_{r2} = \frac{d\psi_{r2}}{dt} + R_{r2}i_{r2}, \\ U_{r3} = \frac{d\psi_{r3}}{dt} + R_{r3}i_{r3}, \\ U_{r4} = \frac{d\psi_{r4}}{dt} + R_{r4}i_{r4}, \\ U_{r5} = \frac{d\psi_{r5}}{dt} + R_{r5}i_{r5}, \\ U_{r6} = \frac{d\psi_{r6}}{dt} + R_{r6}i_{r6}. \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Так как средства приложения Simulink позволяют оперировать векторными величинами, то запишем уравнения в векторной форме, это облегчит вычисления и ускорит работу приложения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{U}_s = \mathbf{R}_s \cdot \mathbf{i}_s + \frac{d\psi_s}{dt}, \\ \mathbf{0} = \mathbf{R}_r \cdot \mathbf{i}_r + \frac{d\psi_r}{dt}. \end{array} \right. \quad (3.3)$$

где

$$\mathbf{U}_s = \begin{bmatrix} U_{s1} \\ U_{s2} \\ U_{s3} \\ U_{s4} \\ U_{s5} \\ U_{s6} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_s = \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \\ i_{s4} \\ i_{s5} \\ i_{s6} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\psi}_s = \begin{bmatrix} \psi_{s1} \\ \psi_{s2} \\ \psi_{s3} \\ \psi_{s4} \\ \psi_{s5} \\ \psi_{s6} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{U}_r = \begin{bmatrix} U_{r1} \\ U_{r2} \\ U_{r3} \\ U_{r4} \\ U_{r5} \\ U_{r6} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_r = \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \\ i_{r4} \\ i_{r5} \\ i_{r6} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\psi}_r = \begin{bmatrix} \psi_{r1} \\ \psi_{r2} \\ \psi_{r3} \\ \psi_{r4} \\ \psi_{r5} \\ \psi_{r6} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{s3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{s4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{s5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{s6} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} R_{r1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{r2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{r3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{r4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{r5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{r6} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$



При условии симметричности фаз можно записать:

$$\begin{aligned} R_{s1} = R_{s2} = R_{s3} = R_{s4} = R_{s5} = R_{s6} = r_s; \\ R_{r1} = R_{r2} = R_{r3} = R_{r4} = R_{r5} = R_{r6} = r_r. \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{r}_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{r}_r = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Получаем:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_s = \mathbf{r}_s \cdot \mathbf{i}_s + \frac{d\psi_s}{dt}, \\ \mathbf{0} = \mathbf{r}_r \cdot \mathbf{i}_r + \frac{d\psi_r}{dt}. \end{cases} \quad (3.11)$$

Обозначим:

$$\begin{aligned}
A_1 &= \cos \varphi; A_2 = \cos(\varphi + \frac{2\pi}{6}); A_3 = \cos(\varphi + \frac{4\pi}{6}); \\
A_4 &= \cos(\varphi + \frac{6\pi}{6}); A_5 = \cos(\varphi + \frac{8\pi}{6}); A_6 = \cos(\varphi + \frac{10\pi}{6});
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Потокосцепление обмотки каждой фазы является функцией всех токов статора и ротора. Системы уравнений для потокосцеплений статора и ротора (соответственно индексы «s» и «r») имеют следующий вид:

$$\begin{cases}
\psi_{s1} = L_s \cdot i_{s1} + L_{s1,2} \cdot i_{s2} + \dots + L_{s1,6} \cdot i_{s6} + L_{1,1} \cdot A_1 \cdot i_{r1} + L_{1,2} \cdot A_2 \cdot i_{r2} + \dots + L_{1,6} \cdot A_6 \cdot i_{r6}, \\
\psi_{s2} = L_{s2,1} \cdot i_{s1} + L_s \cdot i_{s2} + \dots + L_{s2,6} \cdot i_{s6} + L_{2,1} \cdot A_6 \cdot i_{r1} + L_{2,2} \cdot A_1 \cdot i_{r2} + \dots + L_{2,6} \cdot A_5 \cdot i_{r6}, \\
\psi_{s3} = L_{s3,1} \cdot i_{s1} + L_{s3,2} \cdot i_{s2} + \dots + L_{s3,6} \cdot i_{s6} + L_{3,1} \cdot A_5 \cdot i_{r1} + L_{3,2} \cdot A_6 \cdot i_{r2} + \dots + L_{3,6} \cdot A_4 \cdot i_{r6}, \\
\psi_{s4} = L_{s4,1} \cdot i_{s1} + L_{s4,2} \cdot i_{s2} + \dots + L_{s4,6} \cdot i_{s6} + L_{4,1} \cdot A_4 \cdot i_{r1} + L_{4,2} \cdot A_5 \cdot i_{r2} + \dots + L_{4,6} \cdot A_3 \cdot i_{r6}, \\
\psi_{s5} = L_{s5,1} \cdot i_{s1} + L_{s5,2} \cdot i_{s2} + \dots + L_{s5,6} \cdot i_{s6} + L_{5,1} \cdot A_3 \cdot i_{r1} + L_{5,2} \cdot A_4 \cdot i_{r2} + \dots + L_{5,6} \cdot A_2 \cdot i_{r6}, \\
\psi_{s6} = L_{s6,1} \cdot i_{s1} + L_{s6,2} \cdot i_{s2} + \dots + L_s \cdot i_{s6} + L_{6,1} \cdot A_2 \cdot i_{r1} + L_{6,2} \cdot A_3 \cdot i_{r2} + \dots + L_{6,6} \cdot A_1 \cdot i_{r6},
\end{cases} \tag{3.13}$$

$$\begin{cases}
\psi_{r1} = L_r \cdot i_{r1} + L_{r1,2} \cdot i_{r2} + \dots + L_{r1,6} \cdot i_{r6} + L_{1,1} \cdot A_1 \cdot i_{s1} + L_{1,2} \cdot A_6 \cdot i_{s2} + \dots + L_{1,6} \cdot A_2 \cdot i_{s6}, \\
\psi_{r2} = L_{r2,1} \cdot i_{r1} + L_r \cdot i_{r2} + \dots + L_{r2,6} \cdot i_{r6} + L_{1,1} \cdot A_2 \cdot i_{s1} + L_{1,2} \cdot A_1 \cdot i_{s2} + \dots + L_{1,6} \cdot A_3 \cdot i_{s6}, \\
\psi_{r3} = L_{r3,1} \cdot i_{r1} + L_{r3,2} \cdot i_{r2} + \dots + L_{r3,6} \cdot i_{r6} + L_{1,1} \cdot A_3 \cdot i_{s1} + L_{1,2} \cdot A_2 \cdot i_{s2} + \dots + L_{1,6} \cdot A_4 \cdot i_{s6}, \\
\psi_{r4} = L_{r4,1} \cdot i_{r1} + L_{r4,2} \cdot i_{r2} + \dots + L_{r4,6} \cdot i_{r6} + L_{1,1} \cdot A_4 \cdot i_{s1} + L_{1,2} \cdot A_3 \cdot i_{s2} + \dots + L_{1,6} \cdot A_5 \cdot i_{s6}, \\
\psi_{r5} = L_{r5,1} \cdot i_{r1} + L_{r5,2} \cdot i_{r2} + \dots + L_{r5,6} \cdot i_{r6} + L_{1,1} \cdot A_5 \cdot i_{s1} + L_{1,2} \cdot A_4 \cdot i_{s2} + \dots + L_{1,6} \cdot A_6 \cdot i_{s6}, \\
\psi_{r6} = L_{r6,1} \cdot i_{r1} + L_{r6,2} \cdot i_{r2} + \dots + L_r \cdot i_{r6} + L_{1,1} \cdot A_6 \cdot i_{s1} + L_{1,2} \cdot A_5 \cdot i_{s2} + \dots + L_{1,6} \cdot A_1 \cdot i_{s6}.
\end{cases} \tag{3.14}$$

Запишем уравнения в векторной форме:

$$\begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{rs} & \mathbf{L}_{rr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix} \tag{3.16}$$

где:

$$\mathbf{L}_{ss} = \begin{bmatrix} L_s & L_{s1,2} & L_{s1,3} & L_{s1,4} & L_{s1,5} & L_{s1,6} \\ L_{s2,1} & L_s & L_{s2,3} & L_{s2,4} & L_{s2,5} & L_{s2,6} \\ L_{s3,1} & L_{s3,2} & L_s & L_{s3,4} & L_{s3,5} & L_{s3,6} \\ L_{s4,1} & L_{s4,2} & L_{s4,3} & L_s & L_{s4,5} & L_{s4,6} \\ L_{s5,1} & L_{s5,2} & L_{s5,3} & L_{s5,4} & L_s & L_{s5,6} \\ L_{s6,1} & L_{s6,2} & L_{s6,3} & L_{s6,4} & L_{s6,5} & L_s \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\mathbf{L}_{rr} = \begin{bmatrix} L_r & L_{r1,2} & L_{r1,3} & L_{r1,4} & L_{r1,5} & L_{r1,6} \\ L_{r2,1} & L_r & L_{r2,3} & L_{r2,4} & L_{r2,5} & L_{r2,6} \\ L_{r3,1} & L_{r3,2} & L_r & L_{r3,4} & L_{r3,5} & L_{r3,6} \\ L_{r4,1} & L_{r4,2} & L_{r4,3} & L_r & L_{r4,5} & L_{r4,6} \\ L_{r5,1} & L_{r5,2} & L_{r5,3} & L_{r5,4} & L_r & L_{r5,6} \\ L_{r6,1} & L_{r6,2} & L_{r6,3} & L_{r6,4} & L_{r6,5} & L_r \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{L}_{sr} = \begin{bmatrix} L_{1,1} \cdot A_1 & L_{1,2} \cdot A_2 & L_{1,3} \cdot A_3 & L_{1,4} \cdot A_4 & L_{1,5} \cdot A_5 & L_{1,6} \cdot A_6 \\ L_{2,1} \cdot A_6 & L_{2,2} \cdot A_1 & L_{2,3} \cdot A_2 & L_{2,4} \cdot A_3 & L_{2,5} \cdot A_4 & L_{2,6} \cdot A_5 \\ L_{3,1} \cdot A_5 & L_{3,2} \cdot A_6 & L_{3,3} \cdot A_1 & L_{3,4} \cdot A_2 & L_{3,5} \cdot A_3 & L_{3,6} \cdot A_4 \\ L_{4,1} \cdot A_4 & L_{4,2} \cdot A_5 & L_{4,3} \cdot A_6 & L_{4,4} \cdot A_1 & L_{4,5} \cdot A_2 & L_{4,6} \cdot A_3 \\ L_{5,1} \cdot A_3 & L_{5,2} \cdot A_4 & L_{5,3} \cdot A_5 & L_{5,4} \cdot A_6 & L_{5,5} \cdot A_1 & L_{5,6} \cdot A_2 \\ L_{6,1} \cdot A_2 & L_{6,2} \cdot A_3 & L_{6,3} \cdot A_4 & L_{6,4} \cdot A_5 & L_{6,5} \cdot A_6 & L_{6,6} \cdot A_1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\mathbf{L}_{rs} = \begin{bmatrix} L_{1,1} \cdot A_1 & L_{1,2} \cdot A_6 & L_{1,3} \cdot A_5 & L_{1,4} \cdot A_4 & L_{1,5} \cdot A_3 & L_{1,6} \cdot A_2 \\ L_{2,1} \cdot A_2 & L_{2,2} \cdot A_1 & L_{2,3} \cdot A_6 & L_{2,4} \cdot A_5 & L_{2,5} \cdot A_4 & L_{2,6} \cdot A_3 \\ L_{3,1} \cdot A_3 & L_{3,2} \cdot A_2 & L_{3,3} \cdot A_1 & L_{3,4} \cdot A_6 & L_{3,5} \cdot A_5 & L_{3,6} \cdot A_4 \\ L_{4,1} \cdot A_4 & L_{4,2} \cdot A_3 & L_{4,3} \cdot A_2 & L_{4,4} \cdot A_1 & L_{4,5} \cdot A_6 & L_{4,6} \cdot A_5 \\ L_{5,1} \cdot A_5 & L_{5,2} \cdot A_4 & L_{5,3} \cdot A_3 & L_{5,4} \cdot A_2 & L_{5,5} \cdot A_1 & L_{5,6} \cdot A_6 \\ L_{6,1} \cdot A_6 & L_{6,2} \cdot A_5 & L_{6,3} \cdot A_4 & L_{6,4} \cdot A_3 & L_{6,5} \cdot A_2 & L_{6,6} \cdot A_1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Тогда с учётом (3.17,3.18,3.19,3.20) и (3.16) получим общую матрицу взаимных индуктивностей:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_s & L_{s1,2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{s1,6} & L_{1,1} \cdot A_1 & L_{1,2} \cdot A_2 & \cdot & \cdot & \cdot & L_{1,6} \cdot A_6 \\ L_{s2,1} & L_s & \cdot & \cdot & \cdot & L_{s2,6} & L_{2,1} \cdot A_6 & L_{2,2} \cdot A_1 & \cdot & \cdot & \cdot & L_{2,6} \cdot A_5 \\ L_{s3,1} & L_{s3,2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{s3,6} & L_{3,1} \cdot A_5 & L_{3,2} \cdot A_6 & \cdot & \cdot & \cdot & L_{3,6} \cdot A_4 \\ L_{s4,1} & L_{s4,2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{s4,6} & L_{4,1} \cdot A_4 & L_{4,2} \cdot A_5 & \cdot & \cdot & \cdot & L_{4,6} \cdot A_3 \\ L_{s5,1} & L_{s5,2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{s5,6} & L_{5,1} \cdot A_3 & L_{5,2} \cdot A_4 & \cdot & \cdot & \cdot & L_{5,6} \cdot A_2 \\ L_{s6,1} & L_{s6,2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_s & L_{6,1} \cdot A_2 & L_{6,2} \cdot A_3 & \cdot & \cdot & \cdot & L_{6,5} \cdot A_1 \\ L_{1,1} \cdot A_1 & L_{1,2} \cdot A_6 & \cdot & \cdot & \cdot & L_{1,6} \cdot A_2 & L_r & L_{r1,2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{r1,6} \\ L_{2,1} \cdot A_2 & L_{2,2} \cdot A_1 & \cdot & \cdot & \cdot & L_{2,6} \cdot A_3 & L_{r2,1} & L_r & \cdot & \cdot & \cdot & L_{r2,6} \\ L_{3,1} \cdot A_3 & L_{3,2} \cdot A_2 & \cdot & \cdot & \cdot & L_{3,6} \cdot A_4 & L_{r3,1} & L_{r3,2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{r3,6} \\ L_{4,1} \cdot A_4 & L_{4,2} \cdot A_3 & \cdot & \cdot & \cdot & L_{4,6} \cdot A_5 & L_{r4,1} & L_{r4,2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{r4,6} \\ L_{5,1} \cdot A_5 & L_{5,2} \cdot A_4 & \cdot & \cdot & \cdot & L_{5,6} \cdot A_6 & L_{r5,1} & L_{r5,2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_{r5,6} \\ L_{6,1} \cdot A_6 & L_{6,2} \cdot A_5 & \cdot & \cdot & \cdot & L_{6,5} \cdot A_1 & L_{r6,1} & L_{r6,2} & \cdot & \cdot & \cdot & L_r \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Тогда систему уравнений для потокосцепления можно записать в объединённой форме следующим образом:

$$\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{i} \quad (3.22)$$

где

$$\boldsymbol{\Psi}_0 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Psi}_s \\ \boldsymbol{\Psi}_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix}. \quad (3.23)$$

Зная вектор потокосцепления, вектор токов можно определить, решая систему линейных уравнений:

$$\mathbf{i} = \mathbf{L}^{-1} \cdot \boldsymbol{\Psi} \quad (3.24)$$

Электромагнитная энергия 6-ти фазной машины определяется выражением:

$$W_{\vartheta} = \frac{1}{2} \psi_0 \cdot i_0 = \frac{1}{2} (\psi_{s1} \cdot i_{s1} + \psi_{s2} \cdot i_{s2} + \psi_{s3} \cdot i_{s3} + \psi_{s4} \cdot i_{s4} + \psi_{s5} \cdot i_{s5} + \psi_{s6} \cdot i_{s6} + \psi_{r1} \cdot i_{r1} + \psi_{r2} \cdot i_{r2} + \psi_{r3} \cdot i_{r3} + \psi_{r4} \cdot i_{r4} + \psi_{r5} \cdot i_{r5} + \psi_{r6} \cdot i_{r6}) \quad (3.25)$$

Электромагнитный момент может быть выражен через электромагнитную мощность:

$$M_{\vartheta} = p_{\pi} \cdot \frac{\partial W_{\vartheta}}{\partial \varphi}, \quad (3.26)$$

$$M_{\vartheta} = -\frac{2}{3} \cdot L_m \cdot p_{\pi} \cdot \mathbf{i}_r^T \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{i}_s. \quad (3.27)$$

где  $\mathbf{B}$  - матрица гармонических составляющих электромагнитного момента:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 \\ b_6 & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 \\ b_5 & b_6 & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ b_4 & b_5 & b_6 & b_1 & b_2 & b_3 \\ b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_1 & b_2 \\ b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_1 \end{bmatrix}; \quad (3.28)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} b_1 = \sin \varphi \\ b_2 = \sin(\varphi + \frac{2\pi}{6}) \\ b_3 = \sin(\varphi + \frac{4\pi}{6}) \\ b_4 = \sin(\varphi + \frac{6\pi}{6}) \\ b_5 = \sin(\varphi + \frac{8\pi}{6}) \\ b_6 = \sin(\varphi + \frac{10\pi}{6}) \end{array} \right. \quad (3.29)$$

Избежать наличия гармонических составляющих в формуле электромагнитного момента можно, заменив вектор тока статора через вектор потокосцепления ротора:

$$M_{\circ} = \frac{Z_p}{3} \cdot \mathbf{i}_r^T \cdot \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\Psi}_r, \quad (3.30)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Матрица постоянных коэффициентов  $\mathbf{D}$  получается при замене вектора тока статора, вектором потокосцепления ротора, при этом, переменные коэффициенты матрицы  $\mathbf{B}$  преобразуются в постоянные коэффициенты.

В развёрнутом виде формула нахождения электромагнитного момента имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
M_{\vartheta} = & \frac{Z_p}{3} \cdot (i_{r1} \cdot (\psi_{r2} - \psi_{r3} + \psi_{r4} - \psi_{r5} + \psi_{r6}) + i_{r2} \cdot (\psi_{r3} - \psi_{r1} - \psi_{r4} + \psi_{r5} - \psi_{r6}) + \\
& + i_{r3} \cdot (\psi_{r1} - \psi_{r2} + \psi_{r4} - \psi_{r5} + \psi_{r6}) + i_{r4} \cdot (\psi_{r2} - \psi_{r1} - \psi_{r3} + \psi_{r5} - \psi_{r6}) + \\
& + i_{r5} \cdot (\psi_{r1} - \psi_{r2} + \psi_{r3} - \psi_{r4} + \psi_{r6}) + i_{r6} \cdot (\psi_{r2} - \psi_{r1} - \psi_{r3} + \psi_{r4} - \psi_{r5})
\end{aligned} \tag{3.32}$$

В дополнение к системам уравнений используем основное уравнение динамики электропривода:

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M - M_c \tag{3.33}$$

где  $J_{\Sigma}$ ,  $M$ ,  $M_c$ ,  $\omega$  - соответственно суммарный момент инерции, электромагнитный и статический моменты и угловая скорость двигателя.









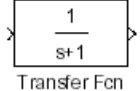

По уравнениям (3.13, 3.32, 3.33) составим модель в системе Simulink.





Используемые в данной схеме блоки приведены в таблице:

Таблица 3.1 – блоки Simulink

Блок	Описание
	<b>Sum</b> – аналоговый сумматор позволяющий алгебраически суммировать любое число сигналов на входе и имеющий один выход
	<b>Sine Wave</b> – синусоидальный сигнал, задается амплитуда ( <b>Amplitude</b> ), частота ( <b>Frequency</b> ), фаза ( <b>Phase</b> ) и среднее значение ( <b>Bias</b> ).
	<b>Integrator</b> - аналоговый интегратор
	<b>Mux</b> — мультиплексор, объединяет несколько сигналов в один «жгут» (векторный сигнал), в параметрах задается число входов ( <b>Number of Inputs</b> ).
	<b>Demux</b> — демультиплексор, позволяет «разбить» векторный сигнал на несколько скалярных, в параметрах задается число выходов ( <b>Number of Outputs</b> ).
	<b>Scope</b> – осциллограф, показывает изменение сигнала в виде графика.
	<b>Matlab Fcn</b> — вызов файла-функции Matlab (в параметрах блока указывается имя файла).
	<b>Gain</b> – усилитель
	<b>Transfer Fcn</b> – передаточная функция
	<b>XY Graph</b> – графопостроитель в системе полярных координат

Simulink автоматизирует следующий, наиболее трудоемкий этап моделирования: он составляет и решает сложные системы алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих заданную функциональную схему (модель), обеспечивая удобный и наглядный визуальный контроль за поведением созданного пользователем виртуального устройства. Средства

визуализации результатов моделирования в пакете Simulink настолько наглядны, что создается ощущение, что созданная в виде блок-схемы модель работает как «живая».

Библиотека Simulink представляет собой набор визуальных объектов, используя которые можно исследовать практически любую систему автоматического регулирования. Практически для всех блоков существует возможность настройки параметров. Параметры настройки отражаются в панели окна настройки выбранного блока.

Библиотека системы Simulink содержит следующие разделы:

- Continuous – блоки аналоговых элементов;
- Discontinuous – блоки нелинейных элементов;
- Diskrete – блоки дискретных элементов;
- Look-Up- Tables – блоки таблиц;
- Math Operations – блоки элементов, определяющих математические операции;
- Model Verefication – блоки проверки свойств сигналов;
- Ports&Sibsystems – порты и подсистемы;
- Signal Attributes – блоки задания свойств сигналов;
- Signal Routing – блоки маршрутизации сигналов;
- Sinks – блоки приема и отображения сигналов;
- Sources – блоки источников сигнала;
- User-Defined Function – функции, определяемые пользователем.

### **3.3 Расчет параметров асинхронного двигателя для структурной схемы**

Технические характеристики асинхронного двигателя 5A225M4 приведены в таблице:

Таблица 3.1 – Каталожные данные двигателя

Элемент характеристики	Параметры двигателя
Мощность, кВт	55
Номинальная частота вращения, об/мин	1475
Напряжение, В	380
Ток номинальный, А	105
Коэффициент полезного действия, %	93
Коэффициент мощности	0,86
Номинальный момент, Нм	356
Отношение критического момента к номинальному	2,2
Отношение пускового тока к номинальному	6,5
Динамический момент инерции ротора, кг*м <sup>2</sup>	0,5
Масса, кг	345
Число полюсов	2p=4

Скорость вращения магнитного поля (синхронная скорость вращения)

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/мин.}$$

Величина номинально скольжения:

$$s_n = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1500 - 1475}{1500} = 0,01$$

Номинальная угловая скорость вращения ротора:

$$\omega_n = \frac{\pi n}{30} = \frac{3,14 \cdot 1475}{30} = 155,43 \text{ рад/с}$$

Угловая скорость вращения магнитного поля:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{2} = 157 \text{ рад/с}$$

Номинальный, максимальный и пусковой моменты:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{55000}{154,38} = 356,26 \text{ Нм},$$

$$M_{\text{макс}} = m_{\text{макс}} M_n = 2,2 \cdot 356,26 = 783 \text{ Нм},$$

Критическое скольжение :

$$s_{\text{к\ddot{o}}} = s_n (m_{\text{макс}} + \sqrt{m_{\text{макс}}^2 - 1}) = 0,01 (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,04$$

Приведенное активное сопротивление ротора

$$R_r = \frac{1}{3} \frac{(P_n + \Pi_{\text{мех}})}{I_n^2 \frac{1-s_n}{s_n}} = \frac{1}{3} \frac{(550000 + 0,015)}{105^2 \frac{1-0,01}{0,01}} = 0,032 \text{ Ом}$$

Пренебрегая потерями в ферромагнитном сердечнике и добавочными потерями в машине, можно считать, что мощность, выделяемая в активном сопротивлении статорной обмотки, определяется выражением:

$$\Pi_{\text{эл}} \approx 3UI_n \cos \varphi (1 - \eta) - 3I_n^2 R_r C^2 - \Pi_{\text{мех}} = 3I_n^2 R_s$$

При определении активных сопротивлений статора и ротора механические потери принимаются равными (0,01 - 0,05) от номинальной мощности. При этом меньшие значения соответствуют машинам с большей

выходной мощностью. Коэффициент приведения  $C$  принимается равным 1,01-1,05 (меньшие значения для машин большей мощности).

Отсюда находим величину активного сопротивления статора:

$$R_s = \frac{U \cos \phi (1 - \eta)}{I_n} - C^2 R_r - \frac{P_{\text{мех}}}{3 I_n^2} = \frac{219 \cdot 0,86 \cdot (1 - 0,93)}{150} - 1,05^2 \cdot 0,0168 - \frac{0,015}{3 \cdot 105^2} = 0,067 \text{ Ом}$$

где  $U = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$  - фазное номинальное напряжение.

Приведенная индуктивность рассеяния ротора

$$L_{SP} = L_{RP} = \frac{U}{4\pi f_1 (1 + C^2) \cdot k_1 I_n} = \frac{219}{4\pi \cdot 50 \cdot (1 + 1,05^2) \cdot 7 \cdot 159} = 0,000225 \text{ Гн}$$

Индуктивность статора и ротора:

$$\begin{aligned} L_S = L_R &= \frac{U}{2\pi f I_n \sqrt{(1 - \cos \phi)^2} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2\pi f M_{\text{max}}}{pU} \cdot \frac{s_n}{s_{\text{кр}}}} = \\ &= \frac{219}{2\pi \cdot 50 \cdot 105 \cdot \sqrt{(1 - 0,86)^2} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 783,77}{2 \cdot 219} \cdot \frac{0,001}{0,004}} = 0,0007 \end{aligned}$$

Индуктивность контура намагничивания:

$$L_m = L_S - L_{SP} = 0,0287 \text{ Гн}$$

В качестве основных базовых величин выбираются амплитудные номинальные значения фазного напряжения и тока, а также номинальное значение угловой частоты.

Значения коэффициентов, рассчитанные по выражениям, приведенным выше, помещены в таблицу:

Таблица 3.2 – Данные трёхфазных асинхронных короткозамкнутых двигателей

Мощность	4кВт	55кВт
$R_s$	1,405 Ом	0,067 Ом
$R_r$	1,395 Ом	0,032 Ом
$L_s$	0,005839 Гн	0,0007 Гн
$L_r$	0,005839 Гн	0,0007 Гн
$L_m$	0,1722 Гн	0,0287 Гн
$J$	0,0131 кг*м <sup>2</sup>	0,621 кг*м <sup>2</sup>
$P_{\Pi}$	2	2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электродвигатели переменного тока являются самыми распространенными видами электрических машин, за счет простоты их изготовления и эксплуатации, невысокой массой, габаритами и стоимостью.

В дипломной работе были представлены результаты исследования многофазного асинхронного короткозамкнутого двигателя переменного тока.

В процессе работы были разработаны математические модели полученные из структурных схем и были получены результаты, на которых видно, что броски момента упругого и время переходного процесса значительно уменьшились по сравнению аналогичным двигателем в трехфазном исполнении.

По полученным данным мы можем сделать следующие выводы: Многофазный асинхронный двигатель может стать альтернативой трёхфазным машинам. Во-первых, многофазный асинхронный двигатель является системой «Многофазный преобразователь частоты — асинхронный двигатель». Преобразователь частоты управляется микропроцессором, следовательно, проблема обеспечения постоянства частоты питающего напряжения, а значит и частоты вращения вала решается на программном уровне. Во-вторых, снижение пульсаций момента и расширение диапазона регулирования скорости на валу многофазного асинхронного двигателя, благодаря увеличенному числу фаз. В третьих, такие двигатели остаются принципиально работоспособными при отключении (обрыве) одной или даже нескольких фаз обмотки статора, так как в этом случае в нём продолжает создаваться вращающееся магнитное поле, что является существенным фактором вообще и в особенности в ответственных технологических процессах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кочетков, В.П. Основы электромеханики: учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / В.П. Кочетков [и др.]; под ред. В.П. Кочеткова. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2010. – 624 с.
2. Кочетков, В.П. Основы теории управления: учебное пособие. 2-е изд., испр. – Абакан: Изд-во ХГУ им Н.Ф. Катанова, 2007. – 272 с.
3. Кочетков, В.П., Багаутинов, Г.А. Теория автоматизированного электропривода: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 1992. – 328 с.
4. Кочетков, В.П. Комбинированные оптимальные системы управления электроприводом // Оригиналы докладов. VI науч.-техн. конф. с международным участием «Элма-90». N 13. ЦИНТИ. – София, 1991. – с.
5. Кочетков, В.П. Оптимальное управление электроприводами / В.П. Кочетков, В.А. Троян. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1987. – 143 с.
6. Ключев, В.И. Учебное пособие по курсу «Теория автоматизированного электропривода»: Ч.1. Динамика электромеханических систем / В.И. Ключев. – М.: Моск. энергет. ин-т, 1978. – 90 с.
7. Герман - Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт., 2001. – 320 с.
8. Важнов, А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Учеб. для студ. вузов. Л.: Энергия, 1980 - 256 с.
9. Герман - Галкин, С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА-век., 2008. – 368 с.
10. Усольцев, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, – 94 с.



11. Кочетков, В.П. Комбинированные оптимальные системы управления электроприводом // Оригиналы докладов. VI науч.-техн. конф. с международным участием «Элма-90». N 13. ЦИНТИ. – София, 1991. – с.
12. Вуль, Ю.Я. Наладка электроприводов экскаваторов [текст] / Ю.Я. Вуль, В.И. Ключев, Л.В. Седаков. 2-е изд., перераб. и доп. – М: Недра, 1975. – 312 с.
13. Кочетков, В.П. К вопросу о математической модели электромеханической системы [текст] / В.П. Кочетков, П.Э. Подборский // Сб. трудов XVII Межд. науч. конф. – Кострома: Изд-во Костромского гос. технол. ун-та, 2004. – С. 173–175.
14. Кочетков, В.П. К вопросу о физико-математическом моделировании динамики экскаваторного электропривода [текст] / В.П. Кочетков, А.А. Колесников, А.В. Коловский // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: тр. 3-ей всероссийской научн.-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 76–81.
15. Кочетков, В.П. Компьютерное моделирование электропривода с учетом жесткости и зазора в механической части [текст] / В.П. Кочетков, П.Э. Подборский // Сб. трудов 5-й Межд. науч.-тех. конф. Ч. 1. – СПб: «Нестор», 2004. – С. 230–234.
16. Кочетков, В.П. Оптимизация систем автоматического управления экскаваторного электропривода [текст] / В.П. Кочетков, А.В. Коловский, Н.С. Дьяченко, И.С. Рублевский // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: тр. VI всероссийской научн.-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – С. 223–227.
17. Кочетков, В.П. Оптимизация управления технологическим процессом открытой добычи полезных ископаемых карьерными экскаваторами [текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.07 / Кочетков Владимир Петрович. – Красноярск, 1996. – 469 с. – Библиогр.: 390–422.

18. Кочетков, В.П. Основы электропривода [текст]: учеб. пособие. / В.П. Кочетков. –2-е изд., испр. – Абакан: Сиб. федер. ун-т; ХТИ – Филиал СФУ, 2007. – 272 с.
19. Кочетков, В.П. Теория автоматизированного электропривода [текст]: учеб. пособие / В.П. Кочетков, Г.А. Багаутинов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 1992. – 328 с.
20. Герман-Галкин, С. Г. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК [текст]. – СПб.: КОРОНА принт, 2003. – 256 с.
21. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением [текст] / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. - М.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
22. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы [текст] / Под общей редакцией А.А. Колесникова - М.: Едиториал УРСС, 2005. - 279 с.
23. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием [текст] : учебник / Г.Г. Соколовский. – Москва : Академия, 2006. – 259 с.
24. Чиликин, М.Г. Теория автоматизированного электропривода [текст] / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С.Сандлер.-М.:Энергия, 1979.– 616 с.
25. Шрейнер, Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами [текст] / Р.Т. Шрейнер, Ю.А. Дмитриенко - Кишинев: ШТИИНЦА, 1982. – 224 с

Бакалаврская работа выполнена мной самостоятельно. Используемые в работе материалы и концепции из опубликованной научной литературы и других источников имеют ссылки на них.

Отпечатано в 1 экземпляре.

Библиография 25 наименование.

«      »                       
(дата)

                                      
(подпись)

Потапов К.Б.  
(ФИО)